

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

**USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR GGG50 NO
FRESAMENTO DE FACEAMENTO EM ALTO AVANÇO**

Welinton Francescon

162004@upf.br

Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

lac@upf.br

Comissão Examinadora – Volmir Supptitz, Wu Xiao Bing

RESUMO

O fresamento em alto avanço é uma estratégia de processo relativamente recente, possibilitado pelo avanço tecnológico dos materiais de ferramentas de usinagem, o que abre espaço para novas investigações de desempenho do processo. Neste trabalho foi desenvolvida uma pesquisa experimental a fim de avaliar a usinabilidade através do desgaste e vida de ferramentas no fresamento frontal de faceamento do ferro fundido nodular GGG 50, sob duas estratégias de processo (fresamento concordante e fresamento discordante). Para isso, foram feitos ensaios de usinabilidade com determinação da curva de vida da ferramenta e a respectiva equação simples de Taylor, adotando-se três valores de velocidade de corte (190, 210 e 230 m/min) e mantendo-se os demais parâmetros fixos, sendo que o valor do avanço é característico do fresamento em alto avanço (0,57 mm/dente). Com a conclusão dos ensaios, pode-se observar que para a estratégia de corte concordante, se obtém uma vida de ferramenta maior em relação a estratégia de corte discordante para os mesmos parâmetros de corte.

Palavras chave: fresamento de faceamento; corte concordante; corte discordante; usinabilidade; vida de ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

A usinabilidade interessa não exclusivamente aos fabricantes de metais, mas também aos consumidores, fabricantes de ferramentas e a todos que se envolvem na produção de peças através da formação de cavaco (FERRARESI, 1975). De uma maneira geral, pode-se dizer que usinabilidade representa o grau de dificuldade ou facilidade de usinar um determinado material.

Dado que quando lançada uma nova liga no mercado, usinabilidade está entre as propriedades que não são publicadas, devido à dificuldade e demora nos ensaios de usinagem, as pesquisas não acompanham a acelerada evolução dos materiais (FERRARESI, 1969).

Em empresas de usinagem com produção em série, visando o planejamento dos períodos de troca de gume de corte das ferramentas de corte, tem-se um desafio em questão da usinabilidade, da forma que ensaios de longa duração requerem grande gasto de material e tempo, buscam adotar métodos com intervalos de tempo menores e com menor gasto de material, mas junto com ensaios de curta duração obtém-se limites de aplicações restritas, e frequentemente conduzem a resultados falsos (FERRARESI, 1975). De forma a obter-se resultados com maior precisão, ensaios de longa duração são mais apropriados.

No ensaio de usinabilidade o método mais comum é o ensaio de longa duração, em que o material ensaiado é usinado até o fim da vida da ferramenta, ou então até um estipulado valor de desgaste da ferramenta de corte (V_b ou K_t) em diferentes velocidades de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014, p.147-148), onde neste caso se dará enfoque principal ao desgaste de flanco (V_b).

Desta forma o presente trabalho tem por objetivo avaliar a usinabilidade em um ensaio de longa duração através do desgaste e vida de ferramentas no fresamento frontal de faceamento do ferro fundido nodular GGG 50, sob duas estratégias de processo (fresamento concordante e fresamento discordante). Para isso, foram feitos ensaios de usinabilidade com determinação da curva de vida da ferramenta e a respectiva equação simples de Taylor.

1.1. Objetivo geral

Este presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a usinabilidade do ferro fundido nodular GGG 50 no fresamento em alto avanço.

1.2. Objetivos específicos

- Comparar a usinabilidade do material GGG 50 fresado nas estratégias de corte concordante e discordante;
- Avaliar o comportamento de desgaste e avarias de insertos de metal duro revestidos nas duas estratégias;
- Obter a curva de vida da ferramenta e a respectiva equação de Taylor (determinação das constantes K e x), para as duas estratégias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ferro fundido nodular GGG50 – características e propriedades

Segundo a norma DIN 1693, denominado GGG 50, ou FE 50007 de acordo com a NBR 6916, o ferro fundido nodular (dúctil) apresenta em sua matriz predominância de ferrita ou perlita, dependendo do tratamento térmico. O ferro fundido nodular é obtido através de uma pequena adição de magnésio e/ou cério ao ferro cinzento antes da fundição, o que produz uma microestrutura e um agrupamento de propriedades mecânicas distintas. Suas características mecânicas na realidade se encontram próximas daquelas do aço. Como por exemplo, tem-se os ferros dúcteis ferríticos com limite de resistência a tração entre 380 e 480 MPa, e ductilidade (percentual de alongamento) variando de 10 a 20 %. Dentre algumas aplicações típicas deste material tem-se, válvulas, corpos de bombas, virabrequins, engrenagens, entre outros componentes de máquinas e componentes automotivos (CALLISTER, 2002, p.255-256).

O ferro fundido nodular GGG 50 apresenta nódulos (esferas), constituídos de grafita. Sua matriz é perlítica (40 a 70%) ou ferrítica (30 a 60%), e pode apresentar no máximo 10% de carbonetos dispersos. Esta estrutura confere ao material uma boa usinabilidade associada a notáveis propriedades mecânicas (Tabela 1). Como algumas aplicações tem-se, tubulações, rolos, coletores de escapamento, carcaças de diferencial, capas de mancal e carcaças de turbo compressores (HUBNER; DE SOUZA, 2014)

Tabela 1 - Propriedades de ferros fundidos nodulares de acordo com a ABNT (NBR 6916/2017).

Classe	Limite mínimo de resistência à tração MPa	Limite mínimo de escoamento (0,2 %) - LE MPa	Alongamento mínimo em 5d - A %	Somente como informação	
				Faixa aproximada da dureza Brinell	Estrutura metalográfica predominante
FE 38017	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica
FE 42012	420	280	12,0	150 - 200	Ferrítica
FE 50007	500	350	7,0	170 - 240	Ferrítica e perlítica
FE 60003	600	400	3,0	210 - 280	Perlítica
FE 70002	700	450	2,0	230 - 300	Perlítica
FE 80002	800	550	2,0	240 - 312	Perlítica
FE 38017-RI ^a	380	240	17,0	140 - 180	Ferrítica

Fonte: ABNT NBR 6919:2017

Em análise realizada por Coracini (2016), o mesmo pode observar que o ferro fundido nodular GGG 50 possui matriz ferrítica-perlítica, apresentado nódulos de grafita primário na forma regular, divididos uniformemente na fase ferrita, constituídos como consequência de inoculação e nodularização, ainda em estado líquido. A estrutura possui também pequenos nódulos de carbono apresentados preferentemente na perlita.

2.2. Usinabilidade de ferros fundidos

De forma simplificada pode-se dizer que usinabilidade é uma grandeza que aponta a facilidade ou dificuldade de se usinar um determinado material (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Junto ao termo usinabilidade estão descritos todos os problemas que um material pode apresentar em sua usinagem. Tem-se o costume de pensar em usinabilidade como sendo uma propriedade do material, daí surge uma necessidade de defini-la quantitativamente afim de testar, comparar e usar as informações junto as decisões relacionadas a produção industrial. Para que se possa caracterizar a usinabilidade de um determinado material, a vida de ferramenta é empregada como sendo o ponto de maior relevância, na prática isto determinado através de ensaios de longa duração, empregando velocidades de corte comuns em máquinas-ferramenta, porém requer um alto tempo de ensaio e uma elevada quantidade de remoção de material (DE AGUIAR, 1999).

Segundo De Aguiar (1999), devido à presença de grafita na microestrutura os ferros fundidos nodulares e cinzentos apresentam uma boa usinabilidade, proporcionando auto lubrificação e a quebra dos cavacos. Deste modo, ferros fundidos com matrizes ferríticas possuem uma maior facilidade na usinagem, devido sua dureza ser relativamente baixa e pela presença de silício. De outro modo, com a presença de perlita na matriz a usinabilidade se torna mais baixa, tendo-se então há inevitabilidade de reduzir a velocidade de corte.

Observa-se na Tabela 2 uma amostra do ferro fundido nodular FE 50007 obtida em condições industriais de fabricação “C” e uma outra amostra sofreu diminuição drástica no teor de silício da composição química “D” com objetivo de diminuir o endurecimento da ferrita, examinando os efeitos sobre a usinabilidade.

Tabela 2 - Composição do material estudado.

Classe	Material	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Mg %	Cu %
FE-50007	C	3,52	3,45	0,13	0,04	0,001	0,048	0,8
	*D	3,75	2,4	0,2	0,06	0,014	0,039	0,41

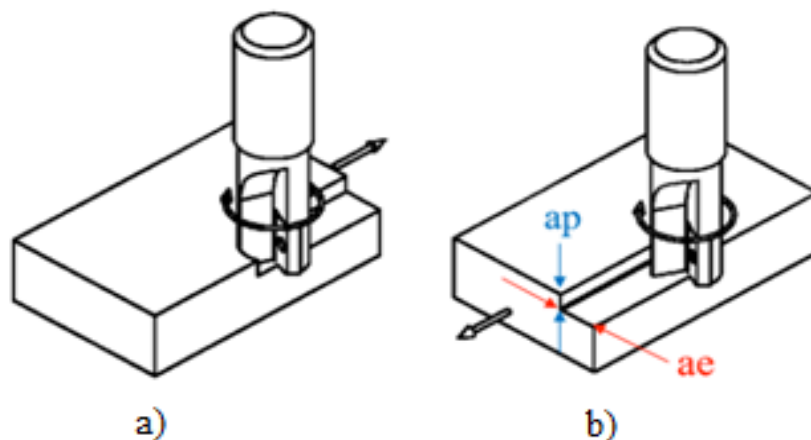
Fonte: GUESSER, et al. [s.d.].

Segundo Guesser et al. [s.d.], observa-se que a amostra com menor teor de silício apresentou melhor usinabilidade, assim, a diminuição do teor de silício tem efeito benéfico sobre a vida da ferramenta.

2.3. Processos de fresamento frontal de faceamento – enfoque para estratégias de corte concordante e discordante

De forma simples o fresamento de faceamento atua na superfície frontal da ferramenta, onde $ap < ae$, sendo “ae” a penetração de trabalho e “ap” a profundidade de usinagem. Podendo ter as estratégias de corte concordante e discordante, onde que no corte concordante o movimento de avanço da peça e o movimento de rotação da fresa tem o mesmo sentido; o oposto ocorre no corte discordante, que o movimento da peça e o movimento de rotação da fresa ocorrem em sentido contrário, conforme pode-se observar na Figura 1.

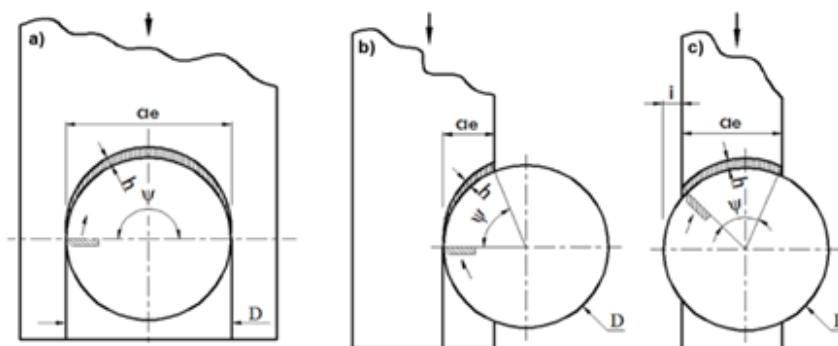
Figura 1- a) frontal concordante e b) frontal discordante



Fonte: DIB, Marcel Henrique Militão, 2015.

No fresamento frontal pode-se ainda distinguir-se três formas de fresar conforme Figura 2, que são: fresamento em cheio, fresamento parcial e fresamento de face onde a peça sempre será menor que a fresa.

Figura 2 - Fresamentos: a) em cheio, b) parcial, c) de face

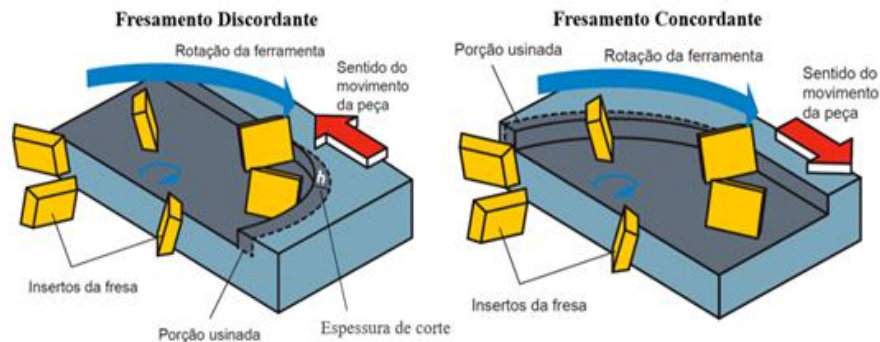


Fonte: DIB, Marcel Henrique Militão, 2015.

2.3.1. Fresamento discordante e concordante

Pela verificação da espessura de corte denominada “h” (Figura 2), pode-se verificar se o fresamento é concordante ou discordante. Iniciando com um valor próximo a zero e aumentando gradualmente até um máximo valor, tem-se o fresamento discordante, o oposto pode-se ver no fresamento concordante, iniciando com um valor de “h” máximo e diminuindo até um valor próximo a zero, podendo ser observado os cortes discordantes e concordante respectivamente na Figura 3.

Figura 3 - Fresamento discordante e concordante.



Fonte: DIB, Marcel Henrique Militão, 2015 (Modificado Mitsubishi).

No fresamento discordante, por iniciar com espessura de corte próximo a zero, a aresta de corte de um dos dentes da fresa é pressionado para o interior da peça, gerando um exagerado atrito, com uma decorrente deformação plástica daquele local ao invés da formação de cavaco. Desta maneira com a tendência de cada dente da fresa em empurrar a peça no sentido contrário ao movimento de avanço há a tendência de eliminar as folgas presentes no complexo de avanço da máquina. Mas, naturalmente devido aos elevados atritos iniciais, tornará a vida útil da ferramenta menor.

No fresamento concordante conforme a variação de espessura, ocorrerá a variação das forças, sendo força máxima no início e mínima ao final do movimento de corte, tendendo a forçar a peça no sentido de avanço. No momento em que os movimentos de corte e de avanço encontram-se no mesmo sentido, poderá acarretar em vibrações na máquina, podendo ser corrigido através da diminuição das folgas no sistema de avanço da máquina. Devido ao dente da fresa iniciar o contato na peça com espessura máxima, não terá contato da aresta cortante com a camada endurecida pelo corte anterior, onde o corte iniciará cisalhante.

Ao fim Dib, Benjamin, Jasinevicius (2015) concluem que fresamento concordante contribui para uma superfície usinada mais espelhada quando comparada com fresamento discordante, porém obtém-se rugosidades mais baixas em fresamento discordante para os mesmos parâmetros de usinagem. Com temperaturas relativamente menores na região de usinagem, o fresamento concordante pode promover um acréscimo na vida útil da ferramenta.

Segundo Correa (2013), em peças fresadas com estratégia de corte discordante, as mesmas apresentaram diversas rebarbas no acabamento, fato este que não é identificado em corte concordante. Rebarbas estas que se dá devido a espessura de cavaco ser maior na saída da ferramenta de corte da peça.

2.4. Desgaste e vida de ferramentas de usinagem

De forma relativamente simplificada, vida da ferramenta se refere ao tempo que a própria trabalha realmente, até a perda de sua aptidão de corte, dentro de um preceito estabelecido previamente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014, p.117).

Na usinagem vários são os tipos de desgaste que ocorrem com a ferramenta, podendo ser citados: desgaste frontal (de flanco), desgaste de cratera, deformação plástica da aresta de corte, trincas e quebra. Neste presente trabalho se dará enfoque principal ao desgaste de flanco, Figura 4 o qual é mais corriqueiro entre os demais, provocado pelo contato entre ferramenta e peça, acontecendo na superfície de folga da ferramenta ocorrendo a modificação da aresta de corte, ocasionando a danificação do acabamento superficial (FERRARESI, 1975).

Figura 4 - Desgaste de Flanco



Fonte: SANDVIK, 2000 (adaptado).

De acordo com a norma ISO 8688-1(2020, p.17):

Medição do desgaste do flanco (VB): É a medida do desgaste do flanco é executada paralelamente à superfície do desgaste da guia e na direção perpendicular à aresta de corte original, ou seja, a distância da aresta de corte original ao limite do desgaste da guia, a qual intersecta o flanco original. Embora, o desgaste do flanco em porção significativa possa ser de tamanho uniforme, haverá variações neste valor em outras partes dos flancos maiores ou menores, dependendo do perfil da ferramenta e fraturas na aresta. Os valores das medições de desgaste do flanco devem, portanto, estar relacionadas com a área ou posição ao longo das arestas de corte nas quais a medida é feita.

Para Sabino (2020) existem fatores determinantes para o fim da vida da ferramenta, os quais são:

- Desgaste de aresta de corte alcançar medidas tão superiores que se teme a quebra da mesma.
- Apresentar elevado desgaste da superfície de folga da ferramenta impossibilitando obter tolerâncias e acabamentos apropriados na superfície da peça.
- Crescimento do desgaste elevando a temperatura da aresta cortante acima da temperatura na qual perderá o fio de corte.
- Interferência no funcionamento da máquina devido elevada força de usinagem, oriunda dos desgastes elevados da ferramenta.

Segundo Correa (2013) a velocidade de corte tem influência significativa sobre a vida de ferramenta, independentemente do avanço, uma vez que aumentada a velocidade de corte implica no aumento das temperaturas de corte, onde que com esses parâmetros uma diminuição na vida de ferramenta é observada. Porém Correa observou também que quando utilizados maiores avanços, obteve-se maior vida útil de ferramenta, fato este que pode ser explicado devido aos menores atritos na entrada do dente e ter um melhor escoamento de cavaco, sendo que com avanços maiores, estabelecem o chamado fluxo lateral de cavaco.

Dos Reis (2019) também observou o mesmo que Correa, onde que com o aumento da velocidade de corte e do avanço, nota-se um aumento no desgaste e conseqüentemente uma redução na vida útil da ferramenta de corte. Ao contrário do que acontece nas condições mais brandas com velocidade de corte e avanço em níveis baixos, ficando evidente a grande conseqüência da velocidade de corte na usinagem de ferro fundido.

Segundo estudo realizado por Padmakumar (2020), na usinagem de um ferro dúctil uma ferramenta com um raio de ponta maior resulta em uma área de contato maior entre a ferramenta

e o material de trabalho, o que resulta em maior atrito. Devido a este atrito, as forças são maiores e resultam em uma grande quantidade de calor na interface ferramenta-cavaco, o que reduz a vida útil da ferramenta. No teste realizado para comparar a taxa de desgaste, Padmakumar comprovou a hipótese e mostrou que a vida útil da ferramenta com um raio de ponta maior era significativamente menor do que a ferramenta com um raio de ponta menor. A ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm proporcionou vida útil mais de 57% maior do que a ferramenta com raio de 2 mm.

Em testes realizados por De Aguiar (1999), com usinagem de ferro fundido nodular FE 50007, com diversos tipos de ferramentas de corte, pode-se concluir que a ferramenta de metal duro com dupla camada de revestimento apresentou-se a mais adequada, conclusão esta que está relacionada ao fato de que garantiu a menor intensidade de desgaste, e conseqüentemente maior vida útil para a ferramenta. Outro fato que se mostrou influente sobre o desgaste da ferramenta está relacionada com a heterogeneidade da microestrutura do material. Dentre as demais ferramentas de corte que apresentaram resultados inferiores tem-se, duas de metal duro com apenas uma camada de revestimento, uma de cermet, duas de cerâmica a base de nitreto de silício e uma de cerâmica a base de óxido de alumínio.

Para determinação do tempo de vida de uma ferramenta de corte por uma determinada velocidade de corte, tem-se a equação de Taylor (equação 1).

$$T = K * Vc^{-x} \quad (1)$$

Onde:

T: vida da ferramenta

K: constante da equação de Taylor

Vc: velocidade de corte

x: coeficiente angular da reta

2.4.1. Metal duro – ferramenta de corte

Devido a variação em sua composição considera-se este material um dos principais utilizados na indústria moderna por apresentar combinação de dureza a temperatura ambiente, dureza a quente, tenacidade e resistência ao desgaste. Formado essencialmente por dois constituintes, que são eles: carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste e um elemento aglomerante ou ligante (FERRARESI 1975).

Segundo Grzesik e Małacka (2011) ao realizar a usinagem do material ferro fundido nodular de EN-GJS- Grau 500-7 (3,78% C, 2,46% Si, 0,32% Mn) com microestrutura perlítica-ferrítica, consistindo em 50% de perlita, 40% de ferrita e 10% grafite. Tem-se a concluir que, para ferramentas de cerâmica não revestidas e revestidas testadas, o crescimento do desgaste de flanco VB coincide bem com o aumento da força de atrito. O chanfro sofre desgaste intenso causando a formação de uma ranhura ao longo das partes ativas das arestas de corte e do canto.

2.5. Metal duro com cobertura

Na usinagem ao se utilizar ferramentas de corte de metal duro com cobertura, o desgaste de flanco (VB) da ferramenta aumenta de forma mais lenta e gradual em relação a ferramentas não revestidas, devido a elevada resistência ao desgaste encontrada nas camadas de cobertura da ferramenta, até que se atinja valores de VB da ordem de 0,3 a 0,4 mm (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

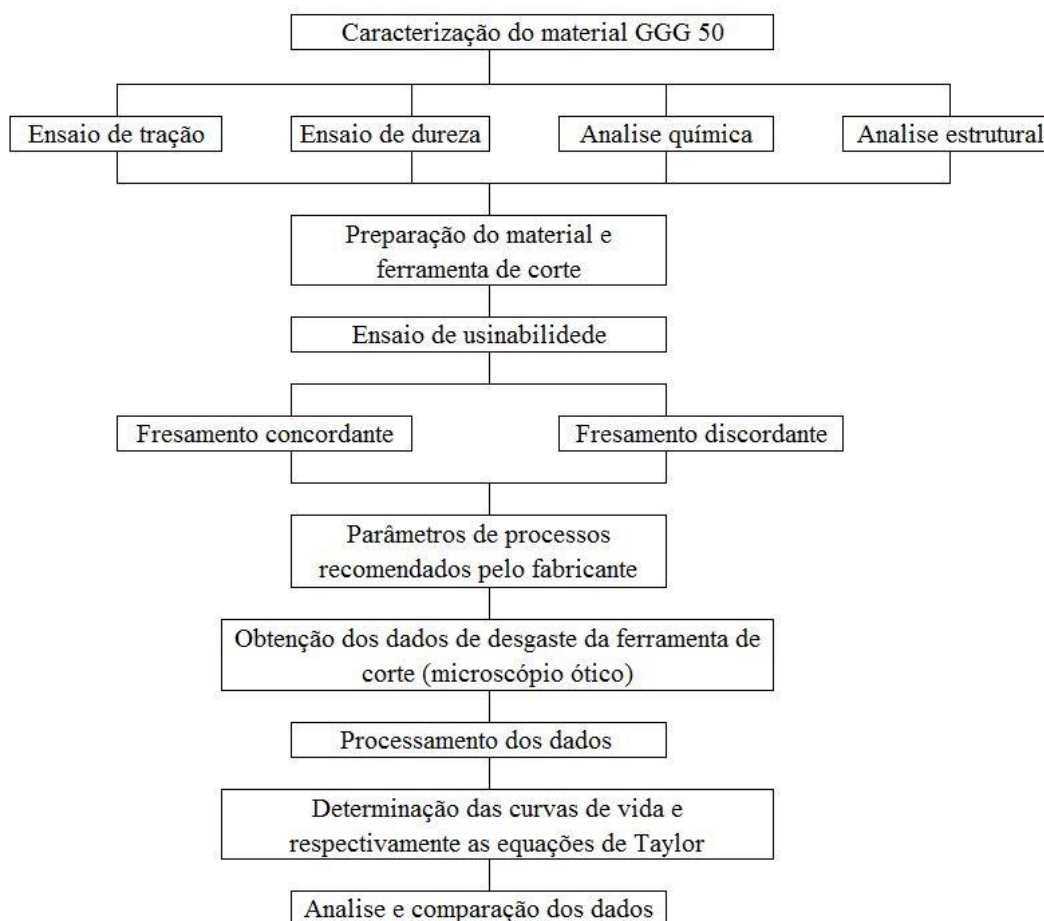
As pastilhas de metal duro com cobertura de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio são utilizadas em larga escala nas indústrias. Com a principal finalidade da camada de cobertura, tem-se o aumento da resistência ao desgaste da camada externa da pastilha, que entrara em contato com a peça e conseqüentemente com o cavaco, buscando desta forma aumentar a vida da ferramenta diminuindo o esforço de corte. Podendo ter de duas até três camadas de cobertura, geralmente estas camadas são aplicadas pelo processo CVD – deposição química a vapor (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Segundo Guesser et al., na usinagem de ferro fundido nodular FE 50007 com ferramenta de corte de metal duro revestido com nitreto de titânio, supõe-se que com o aumento da usinabilidade devido à redução no teor de silício, a vida de ferramenta possa ter um acréscimo entre 70 a 100%.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo se tratará da metodologia de desenvolvimento do ensaio, afim de buscar a melhor estratégia de corte do material obtendo o menor desgaste de ferramenta, conseqüentemente maior vida útil. A Figura 5 sintetiza a metodologia de trabalho.

Figura 5 – Fluxograma da metodologia.



Fonte: o autor (2021).

3.1. Material do experimento/corpo de prova

O corpo de prova do material ferro fundido nodular GGG 50 para o fresamento de faceamento tem há obedecer às dimensões pré-estabelecidas pela ABNT NRB ISO 8688-1, 2020, ou seja, largura de 0,6 vezes o diâmetro da ferramenta e comprimento mínimo de 3 vezes o diâmetro de corte, com altura indeterminada, variando de acordo com o número de ensaios a serem feitos. Porém convém que no mínimo as dimensões sejam adequadas para garantir a estabilidade durante a usinagem.

3.2. Ensaio de tração

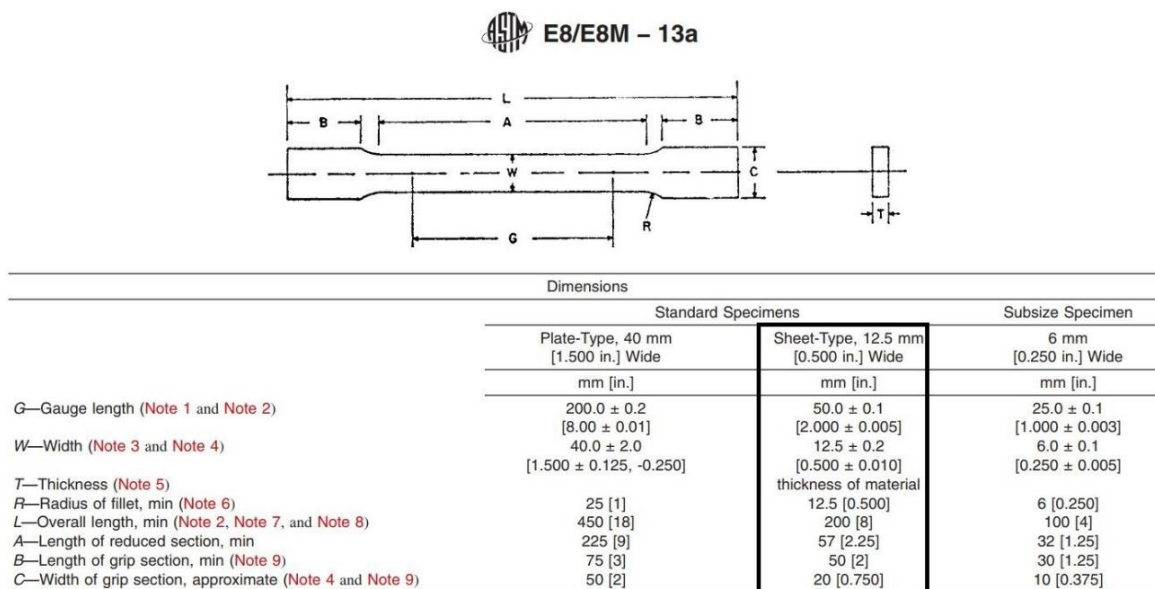
No ensaio de tração uma amostra do material é deformada, geralmente até a sua fratura, mediante uma carga de tração gradativamente crescente que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo. Durante os ensaios, a deformação fica confinada à região central, mais estreita, do corpo de

prova, que possui uma seção reta uniforme ao longo do seu comprimento (CALLISTER, 2002, p.79).

Na realização do ensaio de tração utilizou-se a máquina universal de ensaios modelo: UP14 200 KN, fabricante: Schenk do Brasil, que com o auxílio de um computador conectado com a máquina, onde recebe os dados do ensaio nos possibilita a leitura dos mesmos, como força e deslocamento.

Seguindo a norma ASTM E8M, foi obtido os corpos de prova para ensaio de tração deste trabalho com as dimensões conforme destacado na Figura 6.

Figura 6 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: ASTM E8/E8m.

3.3. Análise química

A composição química dos corpos de prova utilizados neste estudo está apresentada na Tabela 3, e foram medidas com o espectrômetro de energia dispersiva OXFORD Instruments modelo Foundry-Master Xline.

Tabela 3 - Composição química do ferro fundido nodular GGG 50.

Queimas	Elementos									
	Fe %	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Mg %	Nb %	Ti %
1 ^a	91,5	4,5	0,2350	0,6130	0,0182	0,0189	0,440	0,0399	0,0094	0,0139
2 ^a	90,5	4,5	0,2260	0,5950	0,0135	0,0172	0,470	0,0556	0,0101	0,0192
3 ^a	91,7	4,5	0,1840	0,6370	0,0141	0,0118	0,528	0,0316	0,0085	0,0192
4 ^a	91,9	4,5	0,2140	0,5790	0,0123	0,0168	0,519	0,0400	0,0124	0,0150
Média	91,4	4,5	0,2148	0,6060	0,0145	0,0162	0,4893	0,0418	0,0101	0,0168

Fonte: o autor (2021).

3.4. Análise metalográfica

Na análise metalográfica uma pequena amostra de material passa por um processo de embutimento em uma espécie de resina, seguido de um processo de lixamento, de uma lixa de granulometria mais grosseira para uma fina, dando acabamento com uma politriz com auxílio de abrasivos, após polida a peça sofre um ataque químico com nital 2 % e álcool, tendo desta forma o corpo de prova pronto para analisar sua estrutura, onde é utilizado um microscópio ZEISS

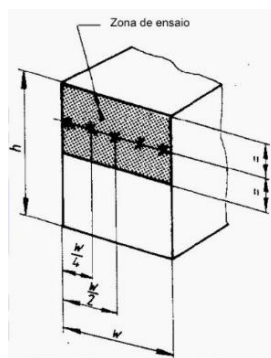
modelo AxioCam MRc 5, que ligado a um computador nos fornece as imagens ampliadas da estrutura do material em análise.

3.5. Ensaio de dureza

Segundo a ISO 8688-1, a dureza da peça deve ser medida na seção transversal de cada extremidade, devendo ser feita a indentação da dureza ao longo de uma linha de centro paralela a aresta mais longa, com número mínimo de cinco pontos de ensaio, sendo um ponto no centro, um em cada lado do ponto central e um próximo a cada aresta, conforme indicado na Figura 7.

Para o ensaio de dureza foi utilizado um durômetro da marca Heckert.

Figura 7- Distribuição dos pontos para medição da dureza



Fonte: ABNT NRB ISO 8688-1, 2020.

3.6. Preparação do material, ferramentas e equipamentos

Segundo as normativas da ISO 8688-1, 2020, recomenda-se que as amostras para o ensaio sejam cortadas das barras nas medidas apropriadas para o determinado experimento, demarcando como a mesma ocupava originalmente a posição e orientação na barra, seguindo de uma eliminação das superfícies irregulares da amostra.

Convém que a cada início de experimento com a mesma amostra já usinada, seja feito um “corte de limpeza” com pastilhas intercambiáveis novas, afim de remover a camada de material superficial “escama”, ocasionada sob as condições do ensaio anterior.

Para as pastilhas intercambiáveis de metal duro, convém que sejam examinadas as arestas de corte, afim de avaliar visualmente se apresentam defeitos, como rachaduras e lascamentos, usando uma ampliação mínima de 8 vezes. Afim de obter resultados condizentes com a situação do experimento, convém que as pastilhas com arestas de corte com defeito sejam descartadas do ensaio.

Na montagem das pastilhas intercambiáveis, as mesmas devem ser montadas conforme recomendação do fabricante. Uma vez que retiradas do alojamento, convém que sejam marcadas as posições das mesmas, para quando der sequencia no ensaio, as mesmas serem montadas em seu alojamento de início.

Para não haver folga e/ou desajustes, deve-se imediatamente antes da montagem da ferramenta no fuso, fazer uma limpeza no fuso da máquina e no cabeçote. Os valores dos batimentos radiais e axiais de cada pastilha intercambiável alojada no cabeçote do fuso devem ser registrados, usando um indicador com graduação de $1\ \mu\text{m}$ e um apoio plano.

Convém antes de se iniciar ao ensaio ligar a máquina ferramenta rodando o fuso num período de 30 minutos para aquecer a máquina, a uma velocidade 0,7 vez a velocidade máxima do fuso ou a velocidade na qual será usada no ensaio. Durante este período, em intervalos de 5 minutos deve-se ativar o avanço pelo menos igual ao do ensaio, na região de aplicação do ensaio para causar um movimento de eixo. Recomenda-se ainda que todos os dispositivos de fixação sejam ensaiados, afim de garantir a fixação correta da peça.

3.7. Parâmetros do processo

Os ensaios serão realizados com parâmetros indicados pelo fabricante das ferramentas de corte (insertos), sendo três condições de uso de velocidades de corte, ou seja, 190, 210 e 230 m/min. O avanço e a profundidade de corte serão constantes, sendo $f = 0,57$ mm/dente e $a_p = 2$ mm, respectivamente.

3.8. Medição do desgaste do flanco (VB)

Para medição do desgaste de flanco (VB), utiliza-se um estéreo microscópio binocular, da marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C. Os intervalos de tempo para a coleta dos dados das variáveis de saída foram definidos com base na série normalizada de Renard (R10): 2; 4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25 minutos, onde a medição é executada na direção perpendicular à aresta de corte original e paralelamente à superfície do desgaste da guia, isto é a medida da aresta de corte original ao limite do desgaste da guia, a qual encontra o flanco original.

3.9. Materiais e métodos

Para o desenvolver do presente trabalho foi utilizado os seguintes equipamentos, máquinas e afins para a preparação de material e processos para execução dos ensaios.

Para a preparação dos corpos de prova para ensaio de tração, utilizou-se o centro de usinagem vertical marca ROMI, modelo Polaris V-400 para deixar os corpos de prova na medida exigida pela norma.

Na análise metalográfica necessita-se de uma pequena amostra de material, que passa por um processo de embutimento em uma espécie de resina para facilitar o manuseio da etapa seguinte, o qual passa por um processo de lixamento, de uma lixa de granulometria mais grosseira para uma fina, dando acabamento com uma politriz com auxílio de abrasivos, após polida a peça sofre um ataque químico com nital 2 % e álcool, tendo desta forma o corpo de prova em condições melhores para analisar sua estrutura.

Na análise química uma amostra do material passa por um processo de queima, onde através de um computador ligado ao equipamento de medição, nos fornece a composição química do material em análise.

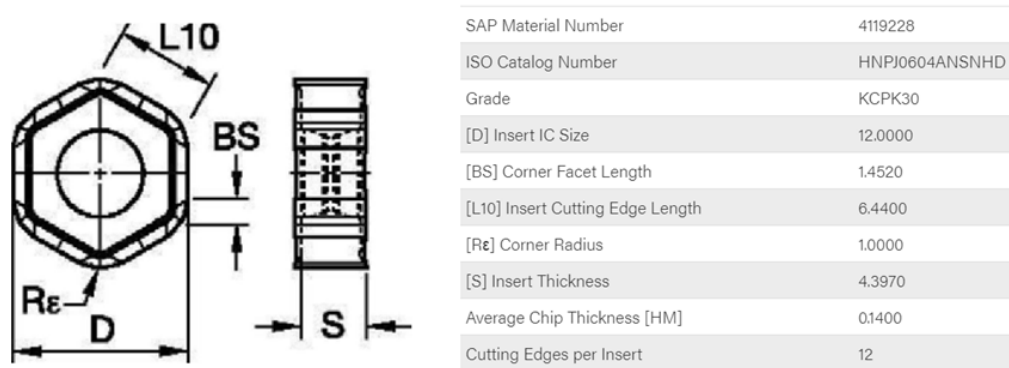
Após passado a etapa com os processos de caracterização do material, inicia-se os testes de fresamento. Para o fresamento ocupa-se insertos intercambiáveis de metal duro revestido, com código HNPJ0604ANSNHD - KCPK30 do fabricante Kennametal com especificações conforme indicado na Figura 8.

O cabeçote para o alojamento dos insertos intercambiáveis também pertence a fabricante - Kennametal com código KSHR063A06RS45HN06, conforme pode ser observado as especificações da mesma na Figura 9. Seguindo conforme a norma ISO 8688-1, onde recomenda que ao planejar o programa dos ensaios leva-se em conta um tipo de ensaio a ser usado para aproximar-se do objetivo do mesmo, onde este caso se encaixa no tipo de caso “B”, onde leva-se em conta uma curva de vida da ferramenta $V_c \times T$, com três velocidades de corte, um avanço e uma profundidade de corte.

Ainda de acordo com a norma ISO 8688-1 (2020, p.24):

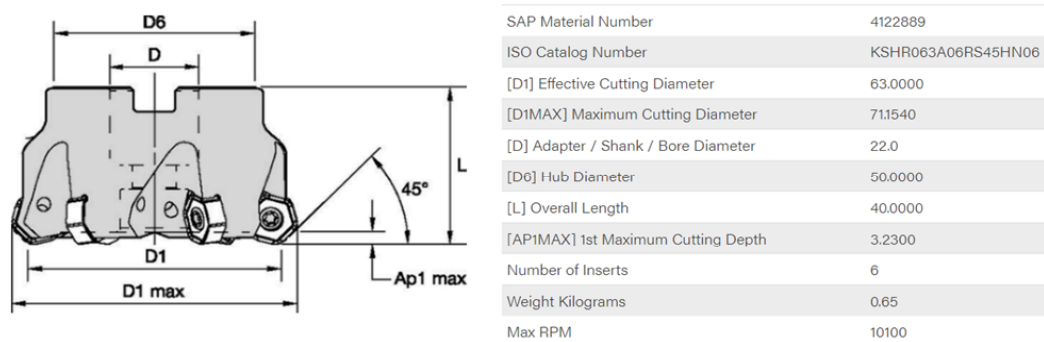
Se uma das pastilhas intercambiáveis falhar durante os primeiros segundos de usinagem, convém que a falha seja anotada, e convém que a pastilha intercambiável seja repostada, mantendo a precisão da posição da aresta de corte e continuando o ensaio. Porém, se diversas pastilhas intercambiáveis forem danificadas, convém que o conjunto inteiro seja trocado e um novo ensaio seja iniciado, sob diferentes condições de corte, aproximando-se da mais provável característica de desgaste das pastilhas comparável com a aplicação industrial.

Figura 8- Especificações dos inserts intercambiáveis utilizados nos ensaios



Fonte: Kennametal, adaptado.

Figura 9 - Especificações do cabeçote utilizado nos testes



Fonte: Kennametal, adaptado.

Para que não se tenha interferência de vibração da peça na usinagem, se requer uma boa fixação da mesma na mesa da máquina, na Figura 10 pode se ver a fixação das peças nas quais foram realizados os ensaios de fresamento para os devidos experimentos deste trabalho.

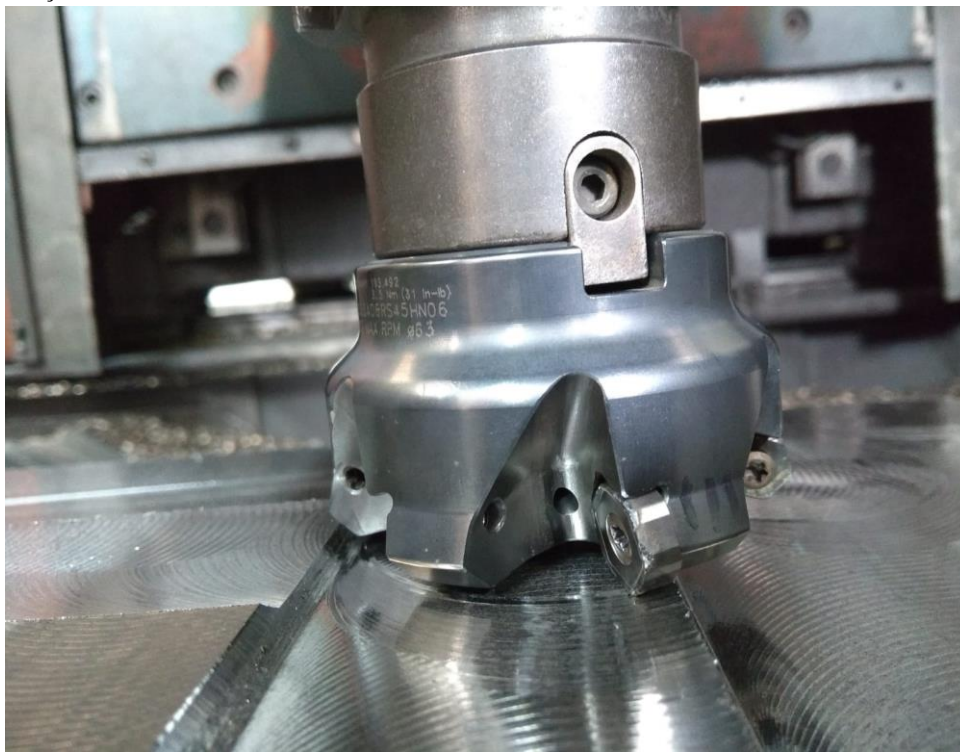
Figura 10- Fixação do material na mesa da máquina.



Fonte: autor (2021).

Assim, com o material fixado inicia se a programação da máquina, tendo como um dos processos o alinhamento do cabeçote com a peça, onde o cabeçote do ensaio obtém de um diâmetro D_1 de 63 cm, que para este experimento utilizou-se uma espessura de penetração a_e correspondente a 75% do diâmetro D_1 , onde o restante do diâmetro do cabeçote fica para fora da peça.

Figura 11 - Cabeçote



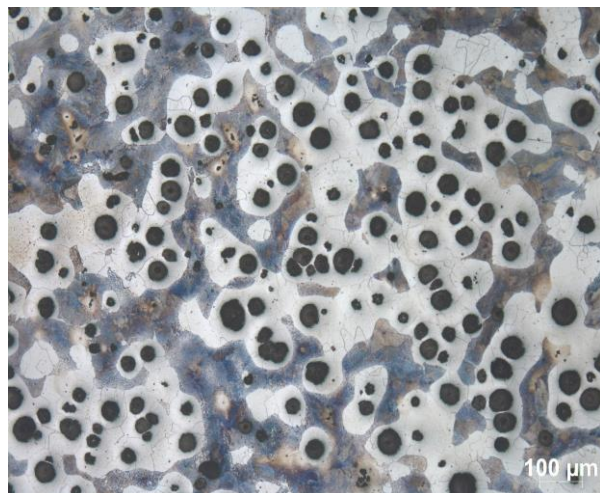
Fonte: autor (2021).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

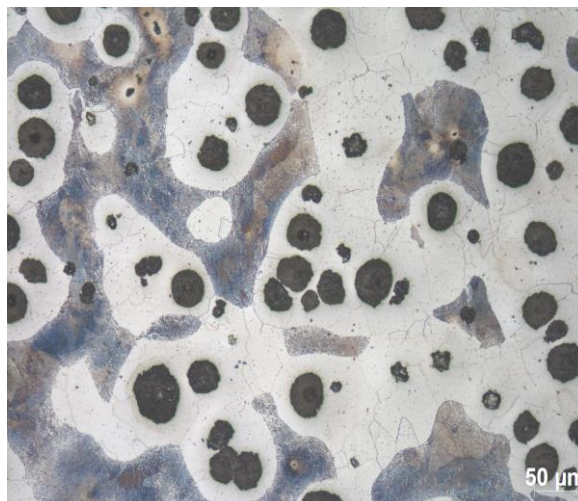
Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos da usinabilidade do ferro fundido nodular GGG50 no fresamento de faceamento em alto avanço através do desgaste e vida de ferramentas, sob duas estratégias de processo (fresamento concordante e fresamento discordante), bem como propriedades do material.

Com uma pequena amostra do material retirado na chapa inicial estudou-se a microestrutura, dureza, metalografia e ensaio de tração do material. Como pode-se ver na Figura 12, em quatro ampliações diferentes, 100x, 200x, 500x e 1000x respectivamente, onde o material representa um ferro fundido nodular perlitico-ferrítico, com nódulos de grafita em preto, fase marrom representando a perlita e a fase branca a ferrita.

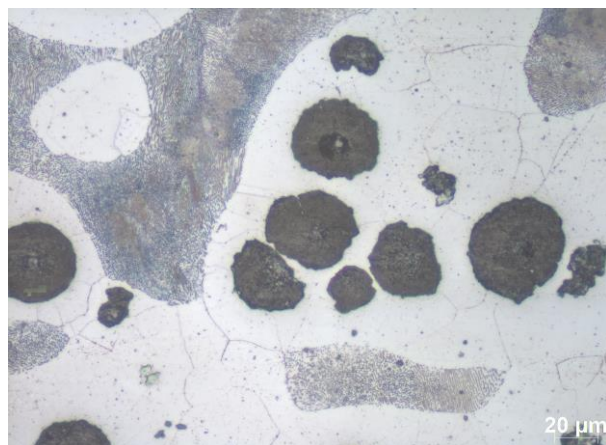
Figura 12 - Imagens microscópicas do ferro fundido nodular GGG 50



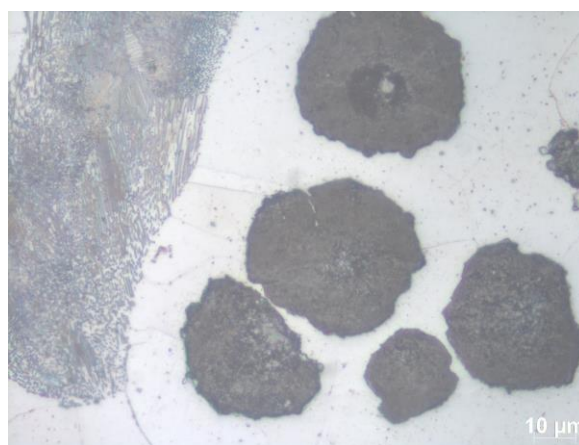
(a) Ampliação 100x



(b) Ampliação 200x



(c) Ampliação 500x



(d) Ampliação 1000x

Fonte: autor (2021).

Através de um durômetro obteve-se os valores de dureza do material na escala HB – dureza Brinell onde são representados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dureza do material ferro fundido nodular GGG50.

Indentação	Dureza (HB)
1 ^a	172
2 ^a	171
3 ^a	171
4 ^a	174
5 ^a	180
Média	173,6

Fonte: autor (2021)

Dentre os ensaios realizados está o de tração, onde na Tabela 5 pode-se observar a tensão máxima de ruptura, alongamento final e tensão de escoamento do material.

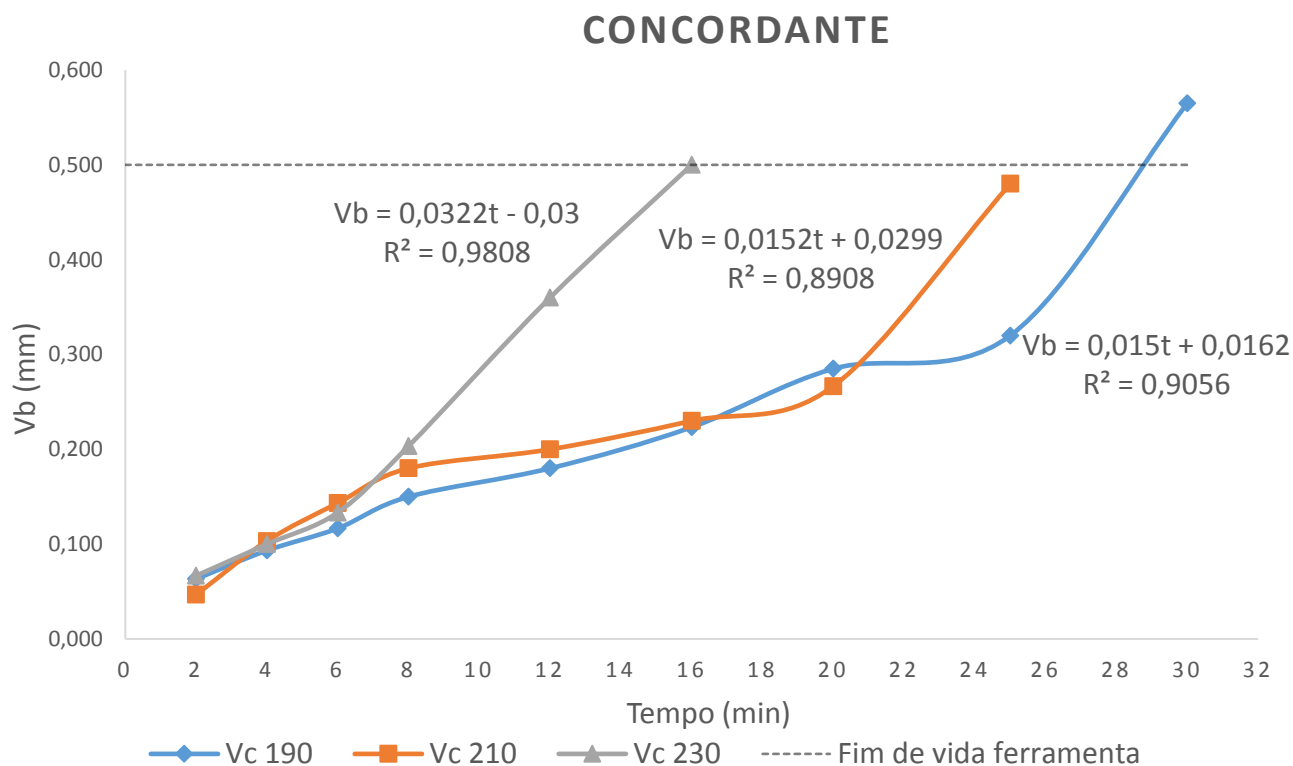
Tabela 5 - Dados ensaio de tração realizado com material ferro fundido nodular GGG 50.

Corpo de prova	Tensão máx. (MPa)	Alongamento (%)	Tensão escoamento (MPa)
1	512,06	3,07	433,01
2	569,29	3,73	458,03
3	521,84	3,88	427,50
4	561,58	3,96	453,17
5	567,96	3,61	463,62
6	553,63	3,25	461,48
Média	547,73	3,58	449,47

Fonte: autor (2021).

Na Figura 13 pode se observar as curvas de desgaste VB das ferramentas para a estratégia de corte concordante para as Vc de 190, 210 e 230 m/min respectivamente, onde observa se que com o aumento da Vc o desgaste também aumenta, tendo assim uma menor vida de ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Analisando o gráfico da Figura 13, com o critério de fim de vida de ferramenta estipulado em 0,5 mm para o desgaste de flanco (Vb), pode se observar que com uma Vc de 190 m/min o respectivo desgaste atingiu se aproximadamente a um tempo de usinagem de 29 minutos, para Vc de 210 m/min a um tempo aproximando de 25 minutos e para a maior velocidade do ensaio, Vc 230 m/min a um tempo de 16 minutos.

Figura 13 – Gráfico desgaste Vb em relação ao tempo no fresamento concordante.

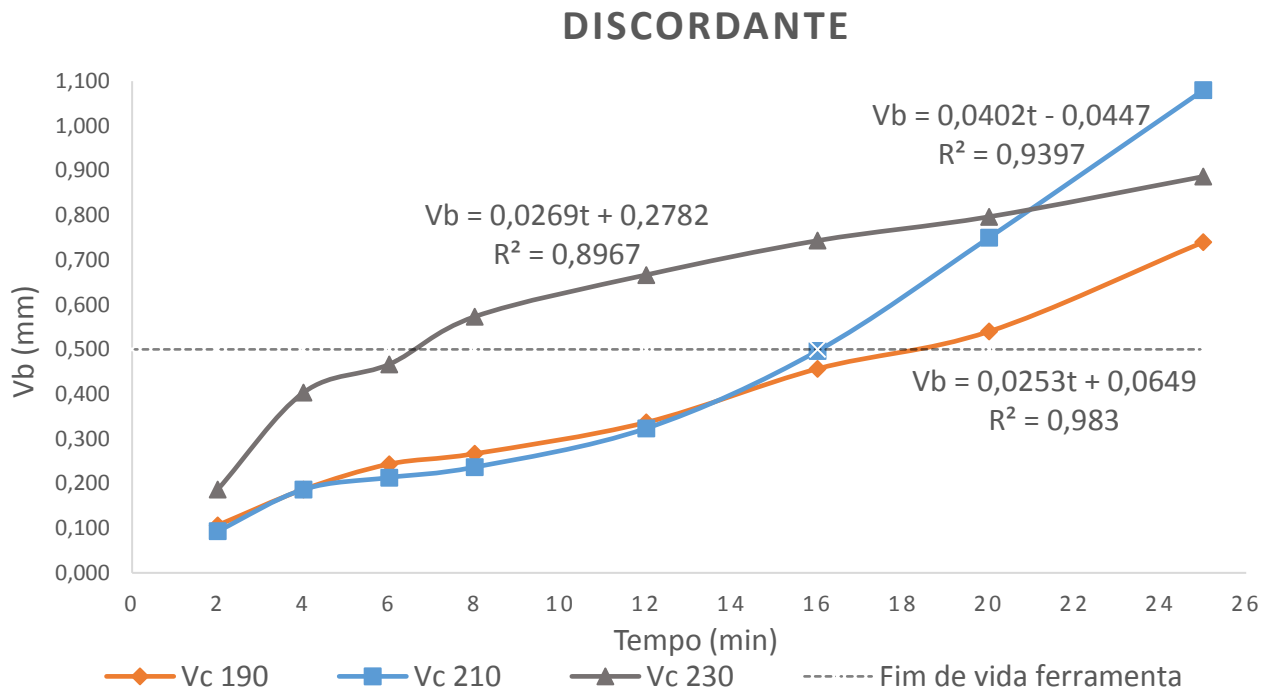


Fonte: autor (2021).

Conforme acontecido com a estratégia de corte concordante, na estratégia de corte discordante também pode se observar o fim de vida da ferramenta com um menor tempo de usinagem conforme aumenta a Vc. Analisando o gráfico da Figura 14, para um mesmo critério de fim de vida de ferramenta de 0,5 mm, pode se observar que com uma Vc de 190 m/min o respectivo desgaste atingiu se aproximadamente a um tempo de usinagem de 18 minutos, para Vc de 210 m/min a um tempo aproximando de 16 minutos e para a maior velocidade do ensaio, Vc 230 m/min a um tempo de 6 minutos.

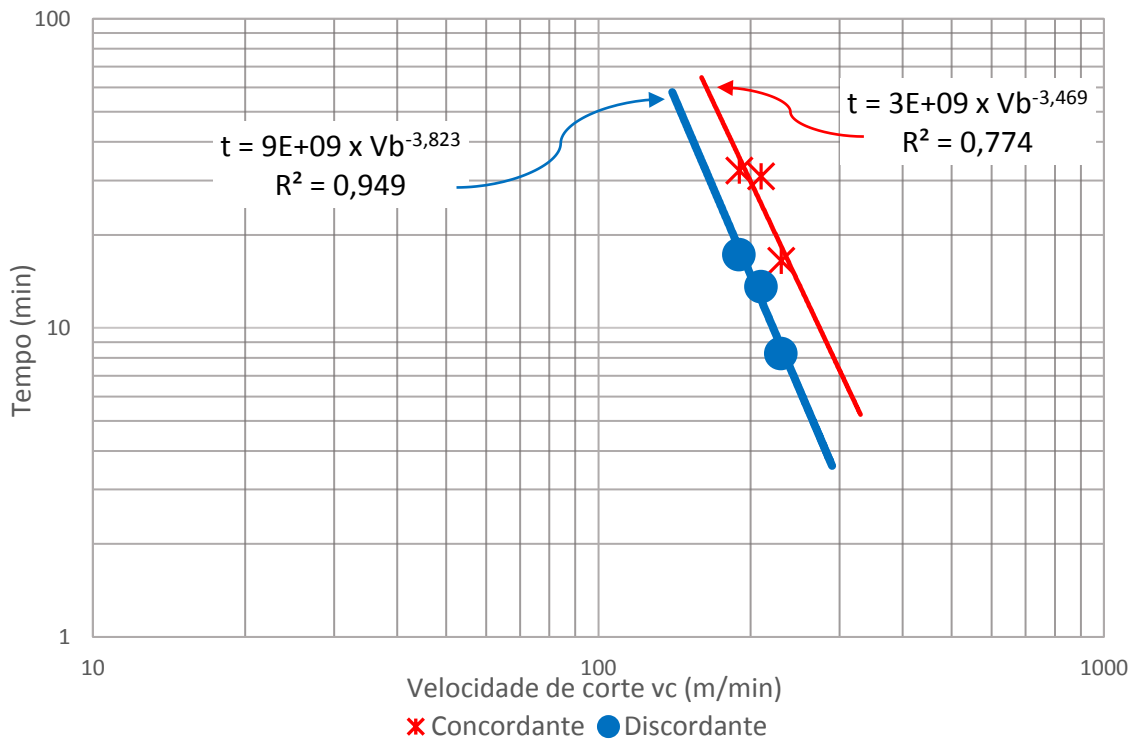
Como pode se verificar no gráfico da Figura 14, para a velocidade de corte de 230 m/min, o fim de vida da pastilha ocorreu de forma prematura quando comparado as outras duas velocidades, podendo se destacar que a velocidade de 230 m/min não serve para o avanço utilizado (0,57 mm/dente), enquanto as demais Vc utilizadas (190 e 210 m/min) não apresentam diferença significativa.

Figura 14- Gráfico desgaste Vb em relação ao tempo no fresamento discordante.



Fonte: autor (2021).

Figura 15 – Gráfico da curva de vida da ferramenta em escala logarítmica.



Fonte: autor (2021).

Analisando as curvas de vida das ferramentas, pode se observar que na estratégia de corte discordante as ferramentas apresentam menor vida útil quando comparadas a estratégia de corte concordante com os mesmos parâmetros. Isso, segundo Stemmer (1995) se dá devido ao corte discordante se iniciar com uma parte mais fina que posterior é encruada, isso determina uma vida menor das ferramentas de corte na fresagem. Tal efeito também é observado por DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014, p. 200, onde citam que na estratégia de corte discordante a pastilha sempre que tocada na peça entrará em contato com uma superfície encruada, causado pelo corte da pastilha anterior. Isso pois no início da operação de cada pastilha, a força de usinagem tende a afastar a ferramenta da peça, empurrando a peça contra a mesa da fresadora, enquanto ao fim da operação de cada pastilha, a aresta cortante tem a tendência de arrancar a peça da mesa. Onde no fresamento concordante esse efeito não ocorre, devido a força da usinagem ter o mesmo sentido, sempre empurrando a peça em direção a mesa.

Como pode se observar nas Figura 13 e Figura 14, conforme tem se o aumento da velocidade de corte, tem se um uma menor vida útil das ferramentas de corte. Conforme analisado por Xavier (2003) dentre os parâmetros de corte da usinagem, a velocidade de corte é um daqueles que mais influência na vida da ferramenta, possuindo grande correlação com a geração de calor na zona de corte.

5. CONCLUSÕES

Como conclusão, pode se destacar a vantagem de se utilizar a estratégia de corte concordante com os parâmetros supracitados, tendo um menor desgaste e conseqüentemente uma maior vida de ferramenta.

Uma análise em conjunto das duas estratégias, analisando o desgaste e suas vidas de ferramentas, pode se observar que a velocidade de corte de 230 m/min não se concilia para com os parâmetros utilizados, sendo que as demais velocidades não apresentam uma diferença significativa. Desta forma, com a insignificância dentre as V_c de 190 e 210 m/min, pensando em um melhor aproveitamento de tempo, com maior produtividade, fica a questão de poder se utilizar a velocidade de corte de 210m/min.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6916**. Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal – Especificações. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 8688-1**. Ensaio de vida de ferramentas no fresamento, Parte 1: Faceamento. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 513**. Classificação e aplicação de metais duros para a usinagem com arestas de corte definidas – Designação dos grupos principais e grupos de aplicação. 2013.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5ª edição. LTC editoras. 2002.

CORACINI, T. **Análise das características estruturais do ferro fundido nodular através de ensaios específicos: um estudo de caso**. 2016. p. 75. Faculdade de Horizontina, Horizontina, 2016.

CORREA, D. S. F. **Estudos dos esforços de corte e vida de ferramenta no faceamento do aço inoxidável 15-5 PH utilizando fresas com insertos intercambiáveis de metal duro**. 2013. p. 114. Engenharia de Materiais e Processos de Fabricação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

DE AGUIAR, G. C. **Análise da usinabilidade do ferro fundido nodular de fundição contínua ABNT Fe-50007**. 1999. p. 122. Fabricação. Universidade de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

DIB, M. H. M.; MACHADO, B. G.; JASINEVICIUS, G. R. **Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante**. Revista Iuminart, nº 13, p. 113-128, 2015.

DINIZ, A. E.; MARCONDES F, C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo. MM editora, 2014, 270 p.

DOS REIS, A. **Fresamento frontal de ferros fundidos de alta resistência**. 2019. p. 200. Materiais e processos de fabricação. Universidade federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Carlos. Editora Edgard Blocher Ltda. 1975.

GRZESIK, W.; MALECKAJ. **Documentation of tool wear progress in the machining of nodular ductile iron with silicon nitride-based ceramic tools**. CIRP Annuals - Manufacturing Technology, p. 4, 2011.

GUESSER, W. L.; DILÇO, C. J.; BOEHS, L.; DELMONTE, N. F. **Usinabilidade de Perfis Contínuos de Ferros Fundidos Nodulares das Classes Fe-45012 e Fe-50007**. Florianópolis. [s.d.].

HUBNER, B. H.; DE SOUZA, J. A. **Avaliação da rugosidade gerada no fresamento frontal assimétrico do ferro fundido nodular Din GGG 50**. In: Congresso nacional de engenharia mecânica, VIII, 2014, Uberlândia. 2014. p. 1-11.

MACHADO, R. Á.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos metais**. Apostila do curso de engenharia mecânica, laboratório de ensino e pesquisa em usinagem da universidade federal de Uberlândia, 2004.

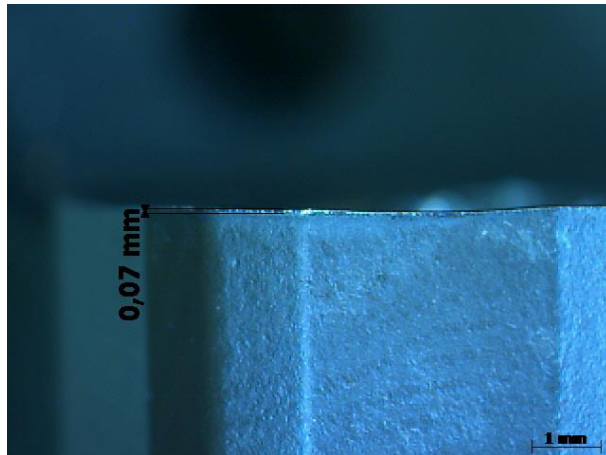
PADMAKUMAR, M.; ARUNACHALAM, M. **Analyzing the effect of cutting parameters and tool nose radius on forces, machining power and tool life in face milling of ductile iron and validation using finite element analysis**, 2020, IOP Publishing Ltda, nº 3. Eng. Res. Express 2. 2020.

SABINO, B. E. **Correlação entre as características de insertos de metal duro utilizados no fresamento de faceamento do aço abnt 1045 e sua vida útil**. 2020. p. 109. Fabricação mecânica e materiais. Universidade tecnológica federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

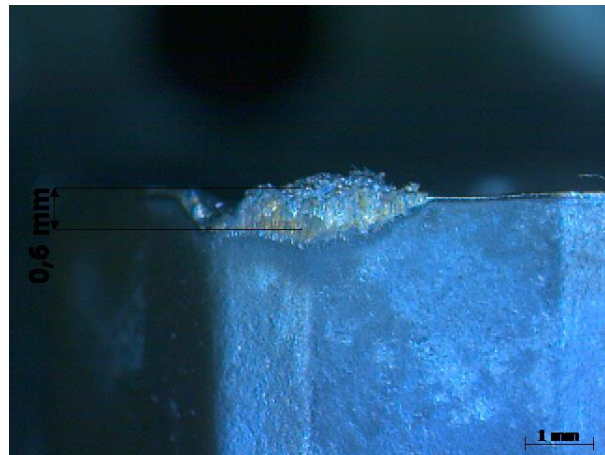
STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. 2ª edição. Editora da UFSC. Florianópolis SC, 1995.

XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-duro, Cerâmica e CBN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis SC, 2003.

APÊNDICE A – Outros exemplos de figuras e gráficos

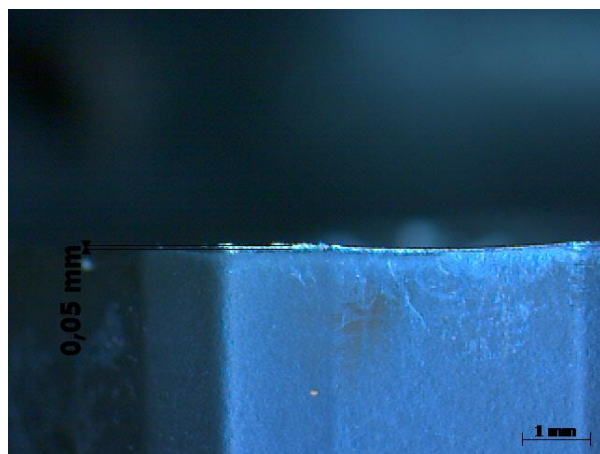


(a) medição desgaste de flanco a 2 minutos de fresamento concordante com vc 190.

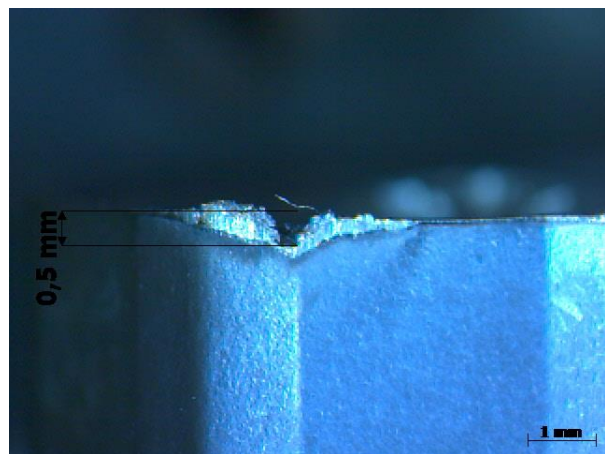


(b) medição desgaste de flanco a 30 minutos de fresamento concordante com vc 190.

Fonte: autor (2021).

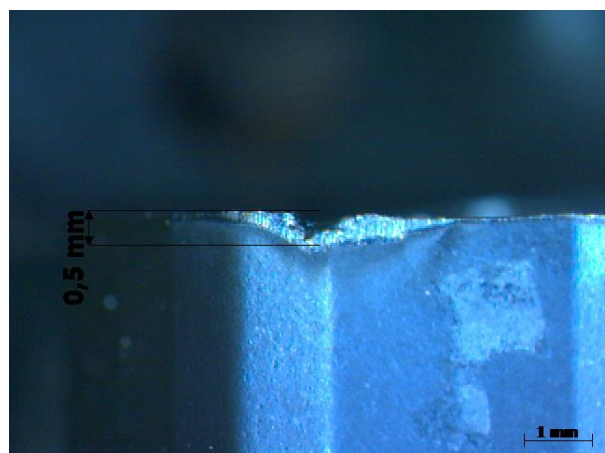
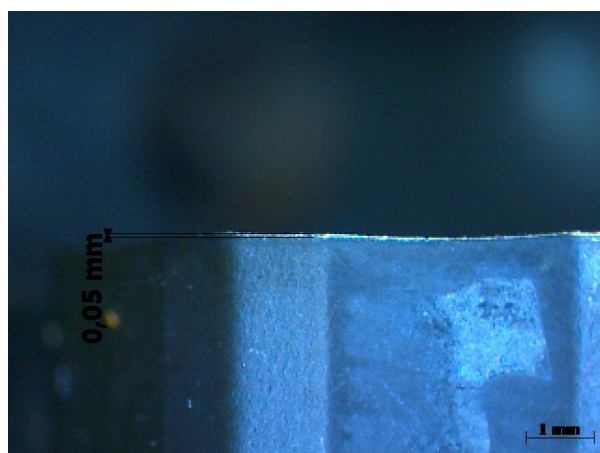


(a) medição desgaste de flanco a 2 minutos de fresamento concordante com vc 210.



(b) medição desgaste de flanco a 25 minutos de fresamento concordante com vc 210.

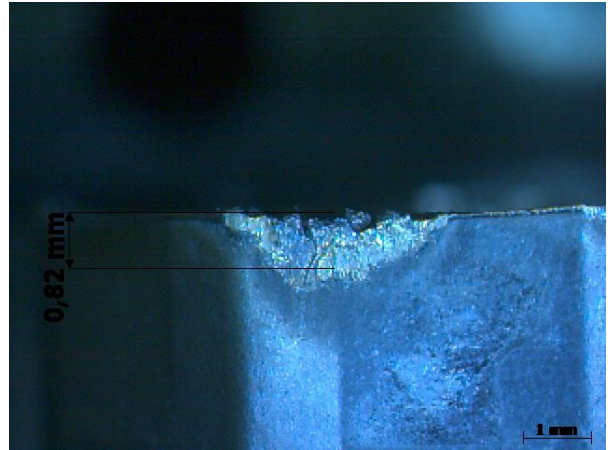
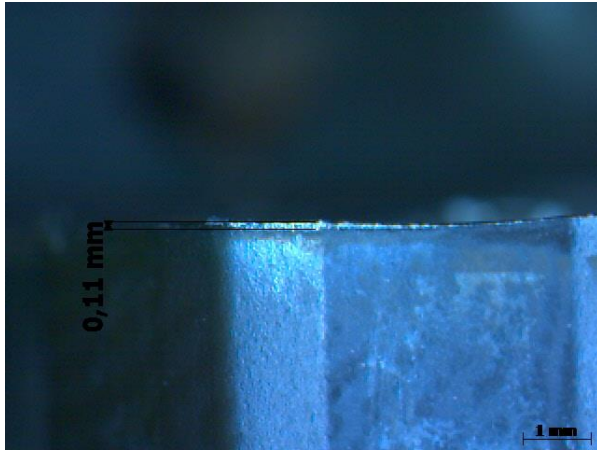
Fonte: autor (2021).



(a) medição desgaste de flanco a 2 minutos de fresamento concordante com vc 230.

(b) medição desgaste de flanco a 16 minutos de fresamento concordante com vc 230.

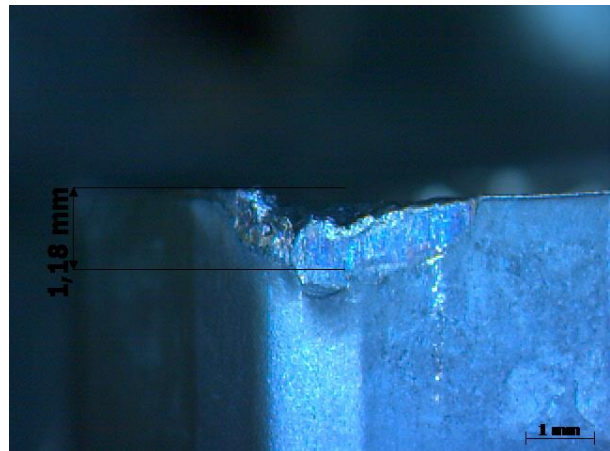
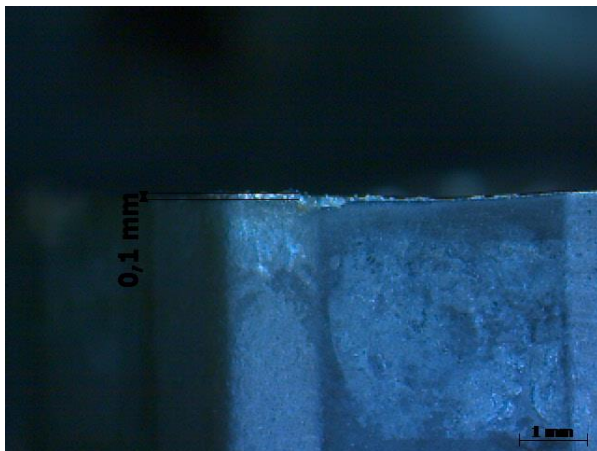
Fonte: autor (2021).



(a) medição desgaste de flanco a 2 minutos de fresamento discordante com vc 190.

(b) medição desgaste de flanco a 25 minutos de fresamento discordante com vc 190.

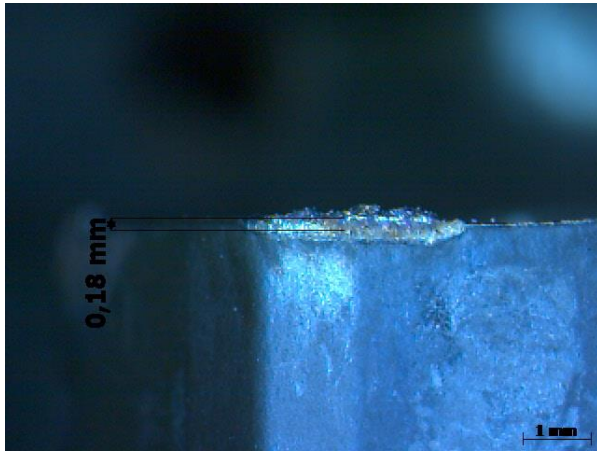
Fonte: autor (2021).



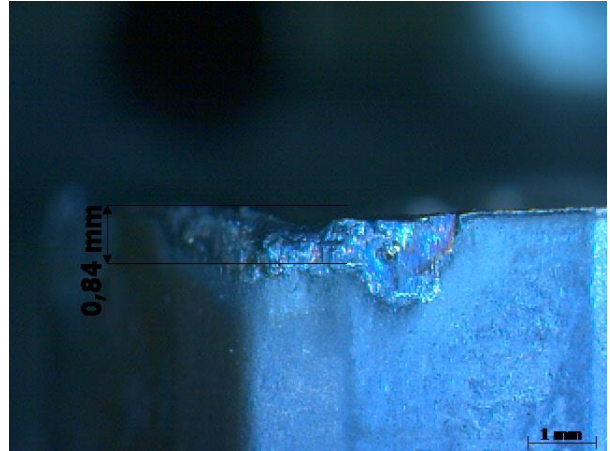
(a) medição desgaste de flanco a 2 minutos de fresamento discordante com vc 210.

(b) medição desgaste de flanco a 25 minutos de fresamento discordante com vc 210.

Fonte: autor (2021).



(a) medição desgaste de flanco a 2 minutos de fresamento discordante com vc 230.



(b) medição desgaste de flanco a 25 minutos de fresamento discordante com vc 230.

Fonte: autor (2021).